

Zeitschrift: Tec21
Herausgeber: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
Band: 138 (2012)
Heft: 45: Solarstrom im Aufwind

Artikel: Von der Sonne zur Erde und wieder zurück
Autor: Leibundgut, Hansjürg
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-309440>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 05.05.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

VON DER SONNE ZUR ERDE UND WIEDER ZURÜCK

Die solare Energie, die an einem Ort zur Verfügung steht, unterliegt täglichen und saisonalen Schwankungen. Sie muss demnach nicht nur in Wärme und Elektrizität transformiert, sondern auch gespeichert und wieder bezogen werden. Für all dies gibt es heute Technologien, die einzeln funktionieren, aber nicht immer gut kompatibel sind. 2007 lancierte die Professur für Gebäudetechnik der ETH Zürich deshalb das Projekt *viaGialla*, um ein in sich schlüssiges System von neuen Technologien für den emissionsfreien Betrieb von Gebäuden zu entwickeln. Das Ergebnis ist *Sol²ergie*, ein System mit klaren Regeln, aber grosser Gestaltungsfreiheit, das auf vier Komponenten beruht: Hybridkollektor, saisonaler Wärmespeicher, Niederhubwärmepumpe und Niedertemperatur-Heizsystem.

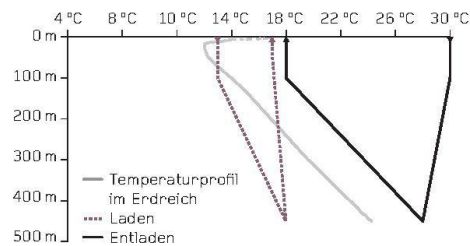
Das Spalten von Uranatomen und das Verbrennen von Kohle, Erdöl und Erdgas zur Erzeugung von Nutzenergie sind nicht mehr opportun und werden längerfristig wohl auch nicht mehr möglich sein. Diese als Primärenergieträger bezeichneten Stoffe sind bequeme Energiespeicher. Doch wenn wir sie nicht mehr nutzen können, werden auch die Technologien wertlos, die wir für die Umwandlung der in ihnen gespeicherten Energie in die jeweils gewünschte Energieform verwenden. Wir müssen uns mit der wahren Primärenergie – der Solarstrahlung – begnügen. Daher brauchen wir neue Speicher und neue Technologien, um vom unsteten Strahlungsfluss der Sonne zu dem von uns gewünschten Energiefluss zu gelangen. Die Energiewende ist auch eine Technologiewende.

Das Ziel von *viaGialla*¹ war deshalb, bis Dezember 2012 neue Technologien zu entwickeln, dank denen die Mehrheit der Gebäude emissionsfrei und mit einem minimalen Exergieverbrauch² funktionieren könnten. Dies führte zum Begriff «ZeroEmission – lowEx». Erste Forschungsergebnisse sind bereits in der Praxis angewendet und getestet worden: beispielsweise bei der Instandsetzung des einstigen Gebäudes für theoretische Physik an der ETH Zürich³ oder beim Neubau des Mehrfamilienhauses B35 an der Bolleystrasse in Zürich (Abb. 02, 04–08).

Auf diese Weise entstand das System *Sol²ergie* = *énergie solaire avec stockage au sol*: ein Arsenal neuer Werkzeuge, die viele Menschen und Institutionen gemeinsam erarbeitet haben und die in Zukunft stetig weiterentwickelt werden sollen.⁴

DIE VORAUSSETZUNG: SEHR EFFIZIENTE WÄRMEPUMPEN

Im Zentrum des Systems *Sol²ergie* stehen die Einlagerung von Solarwärme in einen sehr grossen Speicher im Sommer und die Entnahme der Wärme zwecks Beheizung der Gebäude im Winter. Die einzelnen Teilsysteme lassen sich für jedes Gebäude zu einem individuell optimierten Ganzen zusammenstellen. *Sol²ergie* unterscheidet sich von anderen Systemen dadurch, dass die aus dem Speicher entnommene Wärme immer eine tiefere Temperatur aufweist, als es die Nutzung erfordert. Die Wärme aus dem Speicher muss also mit einer Wärmepumpe auf Solltemperatur veredelt werden. Diese ständige Niedrigtemperaturspeicherung (Abb. 01) ist ein wichtiges Merkmal von *Sol²ergie*: Viele Systeme speichern vor allem im Sommer die Wärme für die Warmwasserproduktion bei 60°C.

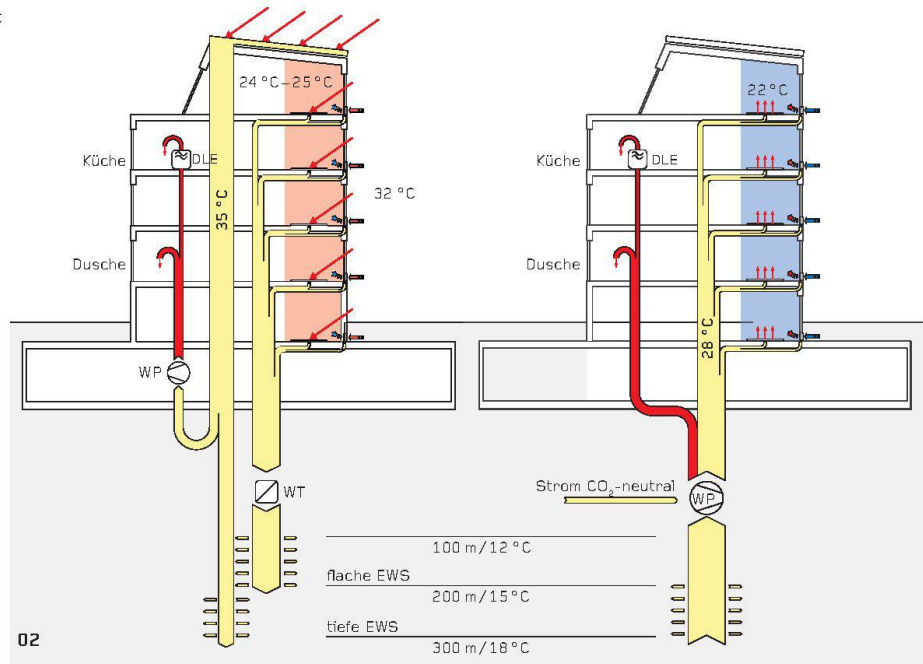


01

01 Typische Temperaturen beim Laden und Entladen des Erdspeichers. (Grafiken 01–03: Autor)

02 Laden und Entladen des Erdspeichers, dargestellt am Beispiel des Gebäudes B35 in Zürich. (Fotos und Pläne vgl. Abb. 04–08)

03 Photovoltaikpaneele produzieren bei Sonneneinstrahlung nicht nur elektrischen Strom, sondern sie erwärmen sich auch. Der an der ETH Zürich entwickelte Hybridkollektor sammelt diese Wärme und leitet sie ab, er funktioniert also gleichzeitig als Photovoltaikpaneel und als thermischer Kollektor. Weil er auf diese Weise laufend gekühlt wird, erhöht sich der Wirkungsgrad der Photovoltaikzellen.



02

COEFFICIENT OF PERFORMANCE COP ODER LEISTUNGSZAHL

(js) Der «coefficient of performance» COP (deutsch: Leistungszahl) bezeichnet den thermischen Wirkungsgrad von Wärmepumpen in einem bestimmten Betriebspunkt. Er gibt das Verhältnis der von der Wärmepumpe abgegebenen Wärmeleistung zur aufgenommenen Antriebsleistung (meist elektrisch) an:

$$\text{COP} = P_W / P_{\text{El}}$$

Je grösser der Temperaturhub (d. h. die Differenz zwischen Wärmequellen- und Heiztemperatur), desto tiefer ist der COP und desto ineffizienter die Pumpe.

Detaillierte Definition von $\text{COP} = P_W / P_{\text{El}}$

Um unterschiedliche Wärmepumpen miteinander vergleichen zu können, wurden bei der Ermittlung von COP-Werten bestimmte Betriebspunkte festgelegt:

– A2W35 für Luft-Wasser-Wärmepumpen
A2: Luft (air) 2 °C

W35: Vorlauftemperatur Wasser 35 °C

– B0W35 für Sole-Wasser-Wärmepumpen
B0: Sole (brine) bei 0 °C

– W10W35 für Wasser-Wasser-Wärmepumpen
Zu P_{El} zählen auch anteilmässig die Leistungen der Heizungspumpe und allfällige Quellenpumpen. Abtauverluste bei den Luft-Wasser-Wärmepumpen werden berücksichtigt.

Somit ist der COP einer gegebenen Wärmepumpe an jedem Betriebspunkt unterschiedlich; umgekehrt weist an einem gegebenen Betriebspunkt jede Wärmepumpe – je nach Bauart und Modell – einen unterschiedlichen COP auf.

Der Strombedarf der Wärmepumpe inkl. der Hilfsbetriebe wird dadurch zum kritischen Element. In den sonnenstrahlungsärmsten Tagen des Jahres muss der emissionsfreie Strom vom öffentlichen Netz bezogen werden. Dadurch wird die Bilanzgrenze des Systems Sol²ergie über das Grundstück hinaus erweitert. Um die Stromversorgung der Schweiz im Jahr 2050 sicherzustellen, muss die durchschnittliche Leistungszahl COP (vgl. Kasten) aller Wärmepumpen der Schweiz in der sonnenstrahlungsärmsten Woche im Jahr den Wert 6 erreichen. Das System Sol²ergie orientiert sich am Wert $\text{COP} = 8$ für das Heizen und die Warmwasserproduktion, was wiederum impliziert, dass der COP für das Heizen den Wert von 10 haben muss. $\text{COP} = 10$ bedeutet:

1. Alle Komponenten der Teilsysteme zur Bereitstellung und Abgabe der Nutzwärme müssen auf diese Forderung optimiert werden.
2. Wenn die Forderung kostengünstig erfüllt werden kann, können alle anderen Teilsysteme einfach gehalten werden.

DER AUFBAU: VIER ZENTRALE KOMPONENTEN

Die vier wesentlichen Komponenten im System Sol²ergie für die Wärmeerzeugung sind:

Die Niederhub-Wärmepumpe

Um den Wert $\text{COP} = 10$ zu erreichen, muss die Wärmepumpe bei einem kleinen Temperaturhub einen hohen Gütegrad (also wenig innere Verluste) aufweisen. Sie muss ferner Temperaturen von 25 °C der Quellwärme verkraften können. Entsprechende Maschinen sind technisch realisierbar und sollen ab 2015 im Markt verfügbar sein.⁵

Das Niedertemperatur-Heizsystem

Niedertemperatur bedeutet eine maximale Vorlauftemperatur auf die Heizflächen von 28 bis 30 °C. Bei Neubauten lässt sich dies leicht erreichen. Für bestehende Bauten müssen in der Regel Anpassungen vorgenommen werden – etwa die Verbesserung der Wärmedämmung, grössere Wärmeabgabeflächen etc. Liegen die Vorlauftemperaturen höher, sinkt der COP. Ob mehr Geld in die Wärmedämmung, die Wärmeverteilung oder in die emissionsfreie Stromproduktion im Winter investiert werden soll, ist eine Frage der ökonomischen Optimierung.⁶ Beim Gebäude B35 (Abb. 04–08) besteht die Wärmedämmung aus 12 cm EPS-Platten (zusätzlich zu insgesamt 25 cm Misaporbeton in den tragenden Aussenwänden und in der Fassade).

Der saisonale Wärmespeicher

Der saisonale Wärmespeicher hat die Aufgabe, der Wärmepumpe jederzeit ausreichend viel Quellwärme bei einer Temperatur $> 15^{\circ}\text{C}$ bereitzustellen. Gemäss heutigem Stand der Technik kann das bei grossen Wärmeleistungen über 200 kW mittels Erdwärmesondenfeldern (mindestens 15 Sonden) mit einer Sondentiefe von 250–300 m erreicht werden. Für kleinere Leistungen muss das Erdreich in 200–500 m Tiefe als Speichermedium verwendet werden. Dazu sind herkömmliche U-Rohr-Sonden ungeeignet, weil der statische Druck ab Tiefen unter 250 m zu gross werden kann, sodass die Rohre platzen. Neuartige Koaxial-Erdwärmesonden sollen ab 2015 im Markt erhältlich sein.⁷

Der Hybridkollektor (Abb. 03)

Erdsondenfelder und tiefe Erdwärmespeicher müssen künstlich regeneriert werden, weil der natürliche geothermische Wärmefluss nicht ausreicht, um die Qualität der Wärmequelle über viele Jahre konstant zu halten. Eine Regeneration mit 30°C im Sommer reicht aus, wenn die eingebrachte Energiemenge gleich gross ist wie die entzogene Energiemenge im Winter. Der an der ETH Zürich entwickelte Hybridkollektor liefert pro Jahr rund 400 kWh/m^2 Wärme bei $25\text{--}30^{\circ}\text{C}$. Infolge der gleichzeitigen Kühlung der Unterseite des Photovoltaikpanels liefert der Kollektor zudem 4–6% mehr Strom im Jahr. Der Hybridkollektor ist ab 2013 am Markt erhältlich. Ab 2015 sind voraussichtlich grossflächige PTV-Dachmodule im Markt verfügbar, in denen der Hybridkollektor mit der Dachdämmung von bis zu 30 cm Dicke kombiniert ist.⁸

DER GEWINN: RADIKALE VEREINFACHUNG DES BAUENS

Dieses System hat den Vorteil, dass auf diverse heute übliche Massnahmen und Geräte verzichtet werden kann. Dies vereinfacht das Bauen, die Wartung und die Nutzung der Gebäude erheblich: Die Regeneration des saisonalen Wärmespeichers kann auch sehr elegant mit sommerlicher Abwärme aus Kältemaschinen erfolgen, zusätzlich oder alternativ zur Regeneration mit Wärme aus den Hybridkollektoren. Zudem sinkt der Stromverbrauch der Kältemaschinen in der heissesten Sommerwoche, weil das Erdreich kühler ist als die Aussenluft. Weitere Vorteile sind:

Auf laute, luftgekühlte Rückkühler kann verzichtet werden.

Die Auswirkungen der drei neuen Komponenten Niederhub-Wärmepumpe, Koaxial-Erdwärmesonde (oder Erdsondenfeld) und Hybridkollektor auf das Bauen sind enorm. Wenn dank guter Optimierung des Teilsystems Wärmeerzeugung/Wärmeabgabe ein $\text{COP} > 8$ in der kältesten Woche erreicht wird, folgt:

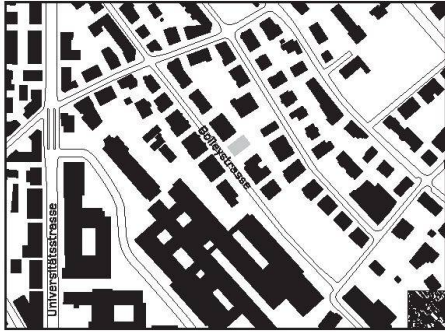
Auf eine Wärmerückgewinnung (WRG) aus der Abluft kann verzichtet werden.

Damit ergeben sich sehr einfache Lüftungssysteme, die durch die Nutzerinnen und Nutzer selbst gewartet werden können. Die Abzugshaube in der Küche wird zum Abluftgerät. Die Zuluft kann über einfache und sehr kleine Geräte in den Raum zugeführt werden, wobei die Luftherwärmer von der Wärmepumpe versorgt werden. Die Abluft der WC und Nasszellen wird ebenfalls ohne WRG, aber kontrolliert über Dach geführt.

Der U-Wert der vertikalen Fassade darf einen Wert von $0.65 \text{ W/m}^2\text{K}$ im gewogenen (gewichteten) arithmetischen Mittel nicht unterschreiten.

Dieser Wert entspricht einer sehr guten Glasfassade, bei der kein Kaltluftabfall und keine Schimmelpilzbildung auftreten und mit der die Strahlungssymmetrie im Raum eingehalten ist. Die möglichst hohe passive Solarnutzung durch die Fenster im Winter wird ersetzt durch die saisonale Speicherung von Sommerwärme aus dem Erdreich. Damit können Gläser mit hoher Selektivität – und einem relativ tiefen g-Wert von ca. 0.3 – eingesetzt werden, die einen einfacheren sommerlichen Wärmeschutz zulassen. Die neuen PVT-Dachmodule werden





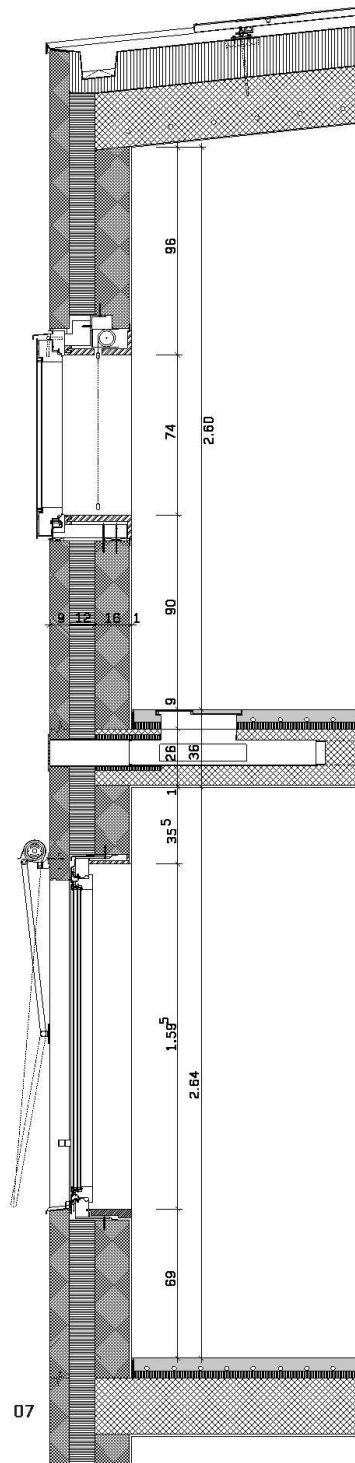
04



05



06



07



08

Mehrfamilienhaus B35, Zürich: Der letztes Jahr fertiggestellte Neubau an der Bolleystrasse 35 erprobt das Prinzip Sol²ergie in der Praxis (Funktionsschema: vgl. Abb. 02).

Bauherren: Hansjürg u. Ulla Leibundgut, Zürich

Architektur: agps architecture, Zürich

Projektleitung: Johannes Leibundgut

Tragkonstruktion: Büro Thomas Boyle, Zürich

HLKS-Planung: Amstein + Walther AG, Zürich

Bauphysik: Amstein + Walther AG, Zürich

Elektroplanung: Mettler + Partner AG, Zürich

Kosten- und Terminplanung: Renokonzert Bau-

leitungs AG, Zürich

Anzahl Geschosse: 6

Einheiten: 4 Wohnungen, 1 Büro, 1 bestehendes

Reservoir

Grundstücksfläche: 700 m²

Baukosten BKP 2: ca. 719.- Fr./m³

Projektphase: 2007–2009

Bauphase: 2009–2011

04 Situation (Pläne 04 u. 07: agps architecture)

05 Innenansicht der Dachwohnung.

(Fotos 05–06: Reinhard Zimmermann)

06 Ein ehemaliges Reservoir wurde in den Neubau integriert.

07 Detailschnitt

Aufbau Schrägdach:

40 mm Dacheindeckung mit Hybridkollektorpaneelen
PU-Flüssigfolie als Abdichtung

50 mm CNS-Platte mit Gewindestange in Krallenplatten verschraubt
Krallenplatten für Profilmontage punktuell mechanisch befestigt
Abdichtung, 1-lagig stumpf gestossen, bituminös

180 mm Wärmedämmung, Foamglas in Heissbitumen vollflächig verklebt
Dampfsperre vollflächig verklebt, bituminös

Voranstrich bituminös

260 mm Stahlbeton, TABS

10 mm Gipsglattnstrich

Aufbau Decke:

Versiegelung

60 mm Fliessestrich, angeschliffen

Bodenheizung

30 mm Trittschalldämmung

Trennlage

260 mm Stahlbeton

10 mm Gipsglattnstrich

Aufbau Fassade:

Lasur pigmentiert

Tiefenhydrophobierung

90 mm Misapor Beton, sandgestrahlt

120 mm Kerndämmung diffusionsoffen, EPS

160 mm Misapor Beton, tragend, Netzarmerung

2-lagig

10 mm Gipsglattnstrich

08 Strassenansicht

Anmerkungen

Unter www.solergie.org steht ein längerer Beitrag des Autors zur Verfügung, in dem er die hier vorgestellten Prinzipien detailliert erläutert.

1 www.viaggiatalla.ch

2 Das Ziel ist, sowohl die vom Gebäude verursachten Emissionen als auch die benötigte Exergie zu minimieren. Dabei gilt:

– ZeroEmission wird erreicht, wenn das Gebäude selbst emissionsfrei funktioniert und auch die von aussen zugeführte Energie (z. B. der im Winter vom Netz bezogene Strom) emissionsfrei erzeugt wurde.

– Unter Exergie (Ex) versteht man dem Gebäude von aussen zugeführte, hochwertige Energieformen, die sich ohne grosse Verluste in andere Energieformen transformieren lassen (z. B. Elektrizität). Dies im Gegensatz zur Anergie, jener thermischen Energie, die bereits auf dem Grundstück vorhanden ist, aber eine tiefere Temperatur als benötigt aufweist und mit einer Wärmepumpe aufbereitet werden muss (mögliche Quellen sind z. B. Abwärme aus Raumluft und Abwasser, Erdwärme, Grundwasser).

Vgl. Judit Solt, «Low Ex + Arch» in: TEC21 47/2007, S. 37–41.

3 Vgl. Dossier TEC21 «Modellfall Sanierung HPZ», August 2011.

4 www.solergie.org

5 www.solergie.org/WP

6 www.solergie.org/Wärmeabgabe

7 www.solergie.org/Koaxial-Erdwärmesonde

8 www.solergie.org/Hybridkollektor,

www.solergie.org/PTV

9 Vgl. Judit Solt, «Low Ex + Arch», in: TEC21 47/2007, S. 37–34, sowie Richard Staub, «Wie intelligent ist intelligentes Wohnen?», in: TEC21 10/2008, S. 25–27.

einen U-Wert $< 0.15 \text{ W/m}^2\text{K}$ aufweisen. Die Dicke der Module ist gegeben durch ihre Rahmenkonstruktion, die sich aus der notwendigen Steifigkeit für die Versetzung mit dem Kran ergibt. Die aktive Kühlung der PV-Module verringert den Wärmeeintrag ins Dachgeschoss im Sommer bei gleichzeitiger Regeneration des Erdspeichers.

Die Warmwassererzeugung kann ebenfalls vollständig neu gelöst werden.

Eine separate Warmwasser-Wärmepumpe bezieht ihre Quellwärme immer aus dem Rücklauf des Wärmeverteilsystems im Gebäude. Im Sommer ergibt sich dadurch automatisch eine Gebäudekühlung, der Strom stammt aus dem Hybridkollektor. Der Wirkungsgrad ist deutlich besser als bei jeder solarthermischen Warmwassererzeugung.

Auf die solare Warmwasser-Vorwärmung wird verzichtet.

Im Winter wird das Warmwasser über zwei nacheinander geschaltete Wärmepumpenprozesse erzeugt. Die Separierung der beiden Aufgaben Heizen und Warmwassererzeugen in zwei Wärmepumpensysteme ergibt eine sehr einfache hydraulische Schaltung und damit eine einfache Steuerung. Der Hybridkollektor liefert die Wärme immer in den Erdsondenkreislauf.

Auf die individuelle Heizkostenabrechnung wird verzichtet.

Die Betriebskosten für Heizung, Lüftung und Warmwasser werden infolge des hohen COP der Wärmepumpe sehr klein. Damit ist eine individuelle Energiekostenabrechnung nicht mehr sinnvoll. Die Investitionen für die Energieerzeugung sind zu über 90 % in den Baukosten enthalten, der Strombezug vom öffentlichen Netz ist sehr gering.

Alle elektrischen Geräte, einschliesslich Leuchten, Storen, Heizungspumpen oder -ventile etc. in den Nutzräumen, werden über digitalSTROM versorgt und von einem digitalSTROM-Server im Elektroschrank der Nutzungseinheit koordiniert (vgl. Kasten). Dieser kleine Server ist im Internet eingebunden. Die Sensoren für Temperatur, Luftqualität etc. liefern ihre Werte ebenfalls über digitalSTROM oder über Funk an den digitalSTROM-Server. Eine neue Raumautomatisierungs-App verbindet die beiden Welten und verwendet Daten aus dem Internet zur Steuerung und Optimierung der Systeme. Deren Komponenten können auch mit anderen Technologien gesteuert werden.

UND DIE KOSTEN?

Ein neues Gebäude mit dem System Sol²ergie kostet im Vergleich zu einem neuen Gebäude, das nach Vorschriften der Kantone und mit einer Ölheizung ausgerüstet erstellt wurde, maximal 150 Fr./m² mehr. Rund ein Drittel dieser Mehrkosten entfallen auf die Erdsonde, zwei Drittel auf den Hybridkollektor. Die Wärmepumpe kostet etwa gleich viel wie eine Ölheizung mit Kessel, Brenner, Kamin und Tank. Die Kosten für die Wärmeverteilung und die Warmwassererzeugung sind gleich. Die Minderkosten wegen der einfacheren Fassade werden nicht berücksichtigt.

Die Lebensdauer der Erdsonde liegt voraussichtlich bei weit über 100 Jahren. Der hydraulische Teil, die Montageeinrichtung und andere Elemente des Hybridkollektors erreichen ein Alter von mindestens 60 Jahren. Der Satz für die Verzinsung des Kapitals kann zu 2 % (dem Satz der Verzinsung des Alterskapitals in den Pensionskassen) angesetzt werden. Damit ergibt sich eine Annuität von max. 4.5 %. Das Sol²ergie-Haus verursacht also rund 6.75 Fr./m² höhere Kapitalkosten pro Jahr. Zum Vergleich: Bei einem Jahresölverbrauch von 6 l/m² für das «Haus nach Vorschrift» darf das Öl maximal 1.12 Fr./l kosten – steigt der Ölpreis über diesen Wert, ist das konventionell geheizte Haus im Betrieb teurer.

Sol²ergie ist mehr als ein Beitrag für die Energiewende. Es ist ein System zur radikalen Vereinfachung des Bauens.

Dr. Hansjürg Leibundgut, Professor für Gebäudetechnik am Institut für Technologie in der Architektur der ETH Zürich, leibundgut@arch.ethz.ch

DIGITALSTROM

(js) Die an der ETH Zürich entwickelte Technologie basiert auf dem Einsatz von «intelligenten Starkstromchips». Im Gegensatz zu bisherigen Chips werden diese nicht im Schwachstrom-, sondern im Starkstrombereich eingesetzt.

Der Chip kann im Internet angesteuert werden und lenkt die Energie dorthin, wo sie benötigt wird. Auf diese Weise können Haushaltsgeräte ihr Verhalten selbstständig optimieren. Dies trägt dazu bei, Stromengpässe zu vermeiden und die nötige Spitzenleistung von Netzen zu beschränken.⁹

Zur weiteren Entwicklung und Verbreitung des digitalSTROM-Systems gründeten dessen Erfinder Wilfried Beck und Prof. Ludger Hovestadt mit Anita Beck und Katharina Schroeder-Boersch 2004 eine eigene Firma. 2007 wurde eine Non-Profit-Organisation ins Leben gerufen, um die neue Technologie weltweit zu verbreiten (www.digitalstrom.org). Im April 2011 erfolgte die Markteinführung in Deutschland und der Schweiz, im Februar 2012 in Österreich und Italien.

www.digitalstrom.com